

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.03.007

基于正态云神经网络的直流输电高频稳态控制

叶友泉, 孙杰杉

(福建省电力有限公司泉州电力技能研究院, 福建 泉州 362000)

摘要: 高压直流输电线路的运行数据直接用于其高频率稳态控制中, 会导致控制结果出现偏差, 为此, 研究了一种基于正态云神经网络的高压直流输电线路高频率稳态控制方法, 构建正态云神经网络模型; 分析高压直流输电线路结构及接线方式, 依据分析结果选取输电线路的逆变侧与整流侧频率差信号及其变化率作为控制信号; 以所选取控制信号为输入, 通过所构建模型的正态云部分处理输入信号, 降低其噪声与不确定性; 处理后信号输入所构建模型的广义动态模糊神经网络部分, 获得稳态控制信号输出, 实现对高压直流输电线路的高频率稳态控制。实验结果显示: 该方法可实现高频率下, 正常运行与加入功率扰动时, 高压直流输电线路的稳态控制, 能够快速有效抑制输电线路的振荡情况, 保持其发电机功率与直流输送功率快速恢复稳定, 进行实时监测所得参数数据产生的噪声影响很小。该方法具有稳定性和可靠性。

关键词: 正态云; 神经网络; 高压直流; 高频率稳; 广义动态模糊

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-1891(2024)03-0052-08

High-frequency Steady-state Control of DC Transmission Based on Normal Cloud Neural Network

YE Youquan, SUN Jieshan

(Quanzhou Electric Power Skills Research Institute of Fujian Electric Power Co., Ltd.,
Quanzhou 362000, Fujian, China)

Abstract: Directly using the operation data of high-voltage direct current (HVDC) transmission lines in their high-frequency steady-state control can lead to deviations in the control results. To address this problem, a high-frequency steady-state control method for HVDC transmission lines based on a normal cloud neural network is explored. A normal cloud neural network model is constructed. The structure and wiring mode of HVDC transmission lines are analyzed, and the frequency difference signals between the inverter side and the rectifier side of the lines and their rates of change are selected as the control signals according to the analysis results. The control signals are used as inputs, and the input signals are processed by the normal cloud part of the model to reduce noise and uncertainty. The processed signals are then input into the generalized dynamic fuzzy neural network part of the model to obtain the steady-state control signal output and realize the high-frequency steady-state control of the high-voltage direct current transmission line. Experimental results show that the method can achieve steady-state control of high-voltage DC transmission lines at high frequency. When normal operation and power disturbances are added, it can quickly and effectively suppress the oscillation of the transmission line, maintain the generator power and DC transmission power to quickly restore stability, and the noise effect generated by real-time monitoring of the obtained parameter data is very small. This method ensures the stability and

收稿日期: 2024-08-05

基金项目: 福建省教育厅福建省中青年教育科研项目(JAT231235)。

作者简介: 叶友泉(1989—), 男, 福建泉州人, 讲师, 硕士, 研究方向: 供用电技术、电力电子技术, e-mail: rlwy278@163.com。

reliability of the DC transmission system.

Keywords: normal cloud; neural network; high-voltage direct current; high-frequency steady-state; generalized dynamic fuzzy

0 引言

高压直流输电线路的高频率稳态控制是确保电力系统稳定运行和高效传输的关键技术之一,高频率稳态控制是指对输电线路在高频范围内的稳态运行状态进行控制,以确保系统的稳定和高效运行^[1-2]。在高压直流输电系统中,频率的稳定性不仅影响电力系统的正常运行,还直接关系到其他电力设备和用户的使用效果^[3-4]。由于输电过程中存在电压稳定性和电流波动、系统负荷变化等多种复杂因素,会对频率的稳定性产生影响。因此,实现高频率稳态控制对于提高输电系统的可靠性和效率具有重要意义^[5]。对高压直流输电线路实施高频率稳态控制后,可以显著降低其频率的波动范围,使电力系统稳定可靠^[6]。

辛业春等^[7]研究的一种特高压直流系统送端频率稳定性控制方法,实现了特高压直流系统在不同时间尺度上的灵活调控,但该方法的多时间尺度调控策略需要引入复杂的控制逻辑和算法,不利于获取更高的控制精度和可靠性,控制信号的指标不易获取。周雷等^[8]所研究的频率稳定控制模型,针对多区域交直流系统展开,为单区域与交直流系统创建模型,以此为依据并结合多区域协调互补,构建多区域交直流系统频率稳定控制模型,但该模型创建过程复杂,且在模型中变量获取过程中存在噪点和不确定性,而该模型并未针对此类变量展开相关处理,导致此类变量的精度无法保证,造成最终控制效果有所下降。徐海珍等^[9]研究了一种基于频率稳定提升的虚拟惯性控制方法,通过控制逆变器的输出功率来吸收或释放电能,从而减缓频率的波动速度,提高系统的频率稳定性,但实际应用中为了减小频率波动率,需要增加虚拟惯性系数,会导致

系统响应速度变慢或产生其他不稳定因素。Suh等^[10]针对输电系统换流器供电微电网频率控制展开研究,该方法可根据系统实际运行情况实时优化运算参数,具有较高的频率控制响应速度,然而受到电力系统负荷变化影响,实时监测数据噪声较大,控制效果受限。

正态云神经网络是通过将正态云模型与神经网络相融合而构建的一种神经网络模型。正态云模型是一种用于处理不确定性和模糊性的数学模型,而神经网络可实现对人脑神经系统的模拟^[11-12],两者结合,可以使得神经网络在处理复杂、不确定和模糊的问题时具有更高的灵活性和准确性。正态云模型被引入到神经网络的某些层或整个网络中,以处理输入数据的不确定性或模糊性,提高模型的鲁棒性和准确性^[13]。正态云神经网络在故障诊断、模式识别、预测分析等领域具有广泛的应用前景。

本文结合正态云神经网络模型,设计一种高压直流输电线路高频率稳态控制方法,实现对不同运行场景下高压直流输电线路的高频率稳定性控制,保障输电系统的稳定运行。

1 高压直流输电线路高频率稳态控制

1.1 高压直流输电线路结构及接线分析

选取输电线路的逆变侧与整流侧频率差信号及其变化率作为控制信号,高压直流输电线路的结构如图1所示。

由图1可知,高压直流输电线路主要包含整流站LCC₁、直流线路电阻R₁、整流侧与逆变侧交流系统母线BUS₁与BUS₂、逆变站LCC₂等。其中,LCC₂用于高压直流输电线路受端交流电网的连接,所选用的为定直流电压控制^[14];LCC₁用于高压直流输电线路的同步机组送端系统、风电场以及含光伏阵列

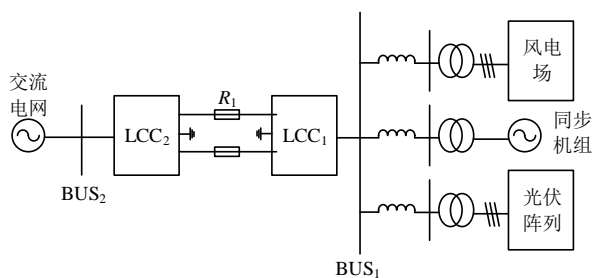


图1 高压直流输电线路结构图

之间的连接,且其只具备单个控制维度,所选用的为定直流电流控制;二者结合用于保持高压直流输电线路运行中直流电压的平稳与功率的平衡。

高压直流输电线路的接线结构一般选用每极两组 12 脉动换流器串联的方式,其各组换流器的额定直流电压为每极直流电压的 1/2^[15],如图 2 所示。

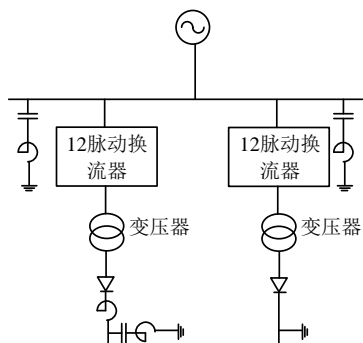


图2 高压直流输电线路的接线结构图

由图 2 可知,每极包含两组 12 脉动换流器,两组换流器在电气上是串联连接的,第 1 组换流器的输出直接连接到第 2 组换流器的输入,两者共同承担输电任务;为了实现 12 脉动效果,每组换流器均配备一个特殊设计的变压器^[16],此变压器具有多个绕组,可产生相位差 30 度的两组三相电压;这两组电压分别供给两组三相桥式整流电路,从而形成 12 脉动波形。

1.2 高压直流输电线路高频率稳态控制整体框架

在高压直流输电技术领域,高频率稳态控制用于描述提高系统对扰动响应能力的控制策略,这种控制策略对于确保电力系统的可靠性和稳定性至关重要,它涉及对系统频率的监控和调节,能够确保无论在高负荷或低负荷情况下,系统频率都能够

保持在一个预定的范围内。适用于高压直流输电线路和交流输电网络,尤其是在互联电网或大规模电力系统和电力系统运行和控制的研究、设计和实施阶段。

在高压直流输电线路高频率稳态控制过程中,所选取的调制信号为高压直流输电线路的逆变侧与整流侧双侧频率差信号,该信号方便量测且能够实时呈现输电线路的频率稳定状况。以所选取调制信号与其变化率作为二维控制信号 z_i ,结合正态云模型与广义动态模糊神经网络模型构建正态云神经网络模型,将二维控制信号输入到正态云神经网络模型中;运用该模型处理此二维控制信号,降低其噪声与不确定性,并经过学习优化获得稳态控制信号;处理后得到的稳态控制信号与输电线路定电流叠加,可以获得稳态控制信号输出,能够实时控制输电线路输送功率,达到正态云神经网络模型的附加控制效果,实现对高压直流输电线路的高频率稳态控制。基于正态云神经网络模型的高压直流输电线路高频率稳态控制框架如图 3 所示。

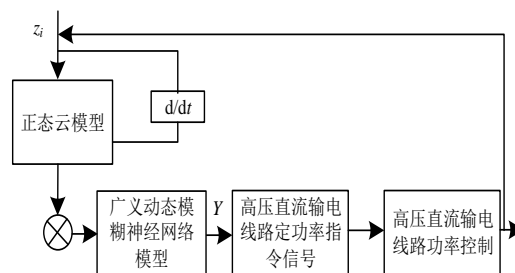


图3 基于正态云神经网络模型的高压直流输电线路高频率稳态控制框架

1.3 基于正态云神经网络的高压直流输电线路高频率稳态控制过程

正态云神经网络模型是结合正态云模型与广义动态模糊神经网络模型的一种神经网络模型。以所选取的二维控制信号为输入,构建正态云神经网络模型,经该模型处理此信号并叠加到输电线路定电流指令信号内,实现对输电线路输送功率的实时控制,达到高压直流输电线路高频率稳态控制。

具体过程如下。

1.3.1 基于正态云模型的输电线路二维控制信号处理

正态云模型能够定性定量变换所输入的输电线路二维控制信号,转换为广义动态模糊神经网络模型可处理的形式,并降低输入信号中的噪声与不确定性。此过程可通过对输入的输电线路二维控制信号实施云滴生成、云滴筛选等操作实现。设 S 表示所输入的输电线路二维控制信号论域; \tilde{C} 表示此论域的概念; z 表示此论域内的信号元素,该信号元素与输电线路高频率稳态趋势的随机数相对应; 设定 $w = \eta_C(z)$ 表示信号元素 z 对概念 \tilde{C} 的确定度; 在论域 S 上信号元素 z 的分布即为云模型。云模型主要由超熵、熵以及期望 3 种特征量组成,其中,超熵可定义为熵的不确定性,可设定成 G_f ; 熵可定义为 \tilde{C} 的不确定性,可设定成 F_m ; 期望可表示为数域上的 \tilde{C} 点,可设定成 F_z 。在上述设定参数下,通过正态云模型定性定量变换所输入的输电线路二维控制信号,变换过程如下。1) 构建正态随机数 F'_m , 此时设定 G_f 表示标准差, F_m 表示期望。2) 构建正态随机数

$$e_{z,w}(z, w) = \begin{cases} e^{-\frac{(z - F_z - \sqrt{-2 \ln w} F_m)^2}{4 G_f^2 \ln w}} / 2 \pi G_f \ln w, & (0 < w \leq 1, F_z \leq z < +\infty) \\ e^{-\frac{(z - F_z + \sqrt{-2 \ln w} F_m)^2}{4 G_f^2 \ln w}} / 2 \pi G_f \ln w, & (0 < w \leq 1, -\infty \leq z < F_z) \end{cases} \quad (4)$$

1.3.2 基于广义动态模糊神经网络模型的输电线路高频率稳态控制

将经由正态云模型预处理后的输电线路二维控制信号输入到广义动态模糊神经网络中,该网络会依据输电线路的实际响应与期望目标之间的差异,学习并调整其内部参数与模糊规则,以此达到输电线路高频率稳态的最优控制,输出稳态控制信号,令高压直流输电线路在稳定的频率下运行。在实时控制过程中,根据输电线路的实时状态和广义动态模糊神经网络的输出计算控制量,并将所得控制量应用于该神经网络模型内,以实现最优控制目

标。广义动态模糊神经网络模型主要由输入、隶属函数、规则以及输出 4 层组成,其结构如图 4 所示。

$$w = e^{-\frac{(z - F_z)^2}{2(F'_m)^2}} \quad (1)$$

4) 重复上述过程,直至获取到 M 个云滴为止。

至此得到 M 个随机云滴 (z_1, z_2, \dots, z_M) 与各个云滴隶属于 \tilde{C} 的确定度 w , (z, w) 表示所获得云滴同确定度的联合分布,该联合分布与正态云 (Z) 、正态云 (W) 、正态云 (Z, W) 相对应。其中,正态云 (Z) 的概率密度函数可表示为如式(2)所示:

$$e_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\left[\frac{(z - F_z)^2}{2w^2} + \frac{(z - F_m)^2}{2(G_f)^2}\right]}}{2 \pi G_f |w|} dw \quad (2)$$

正态云 (W) 的概率密度函数可表示为式(3)所示:

$$e_W(w) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\pi \ln w}}, & 0 < w < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

正态云 (Z, W) 的概率密度函数可表示为式(4)所示:

标。广义动态模糊神经网络模型主要由输入、隶属函数、规则以及输出 4 层组成,其结构如图 4 所示。

由图 4 可知,广义动态模糊神经网络模型的输

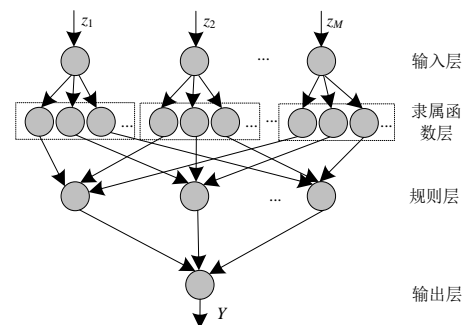


图 4 广义动态模糊神经网络模型结构图

电线路高频率稳态控制过程如下。1)以正态云模型预处理后的输电线路二维控制信号 z_i 为输入,其中 $i = 1, 2, \dots, M$,每个输入信号 z_i 对应神经网络模型输入层的一个输入节点。2)通过隶属函数层的每组隶属函数,对输入的输电线路控制信号 z_i 实施模糊化处理,转换此信号 z_i 为模糊语言变量。其中,隶属函数的运算式如式(5)所示。

$$\theta_{ij}(z_i) = \exp\left[-\frac{(z_i - a_{ij})^2}{\phi_{ij}^2}\right] \quad (5)$$

式中: $\theta_{ij}(z_i)$ 表示输入的输电线路控制信号 z_i 的第 j 个隶属函数,其中, $j = 1, 2, \dots, n$, n 表示隶属函数的数量; a_{ij} 与 ϕ_{ij} 均为广义动态模糊神经网络的前提参数,二者分别表示此输入信号 z_i 第 j 个隶属函数的中心与宽度。

3)通过规则层,依据模糊化后输电线路控制信号以及该神经网络模型学习过程中获得的模糊规则实施模糊推理,并对推理所得模糊信号实施去模糊化处理,获得具体的输电线路控制信号。该层每个模糊规则对应一个节点,以第 j 个规则节点为例,其仅接收隶属函数层各组隶属函数中第 j 个隶属函数节点所输出的信号。第 j 个节点的输出规则可表示为式(6)所示。

$$\mu_j = \exp[-\lambda_i] = \exp\left[-\sum_{i=1}^M \frac{(z_i - a_{ij})^2}{\phi_{ij}^2}\right] \quad (6)$$

式中: λ_i 表示马氏距离。

4)所获得的具体输电线路控制信号经由输出层叠加后向外输出,应用到高压直流输电线路的实际运行控制中,实现对其高频率稳态的控制。输出层最终输出的输电线路控制信号 Y 可表示为式(7)所示。

$$Y = \sum_{j=1}^n \mu_j \omega_j \quad (7)$$

式中, ω_j 表示第 j 条模糊规则的连接权重。其运算式为式(8)所示。

$$\omega_j = q_{j0} + q_{j1}z_1 + \dots + q_{jM}z_M \quad (8)$$

式中: $q_{j0}, q_{j1}, \dots, q_{jM}$ 表示广义动态模糊神经网络模型的 M 个稳态控制参数。

2 实验分析

选取某地高压直流输电系统作为实验对象,运用本文方法对其输电线路的高频率稳定性实施控制,通过实际控制效果检验本文方法的实际应用效果。实验中结合快速仿真原型器RCP与实时仿真器HIL,构建实验输电线路的实时数字仿真平台,如图5所示。



图5 实验仿真平台

由图5可知,该实验仿真平台主要由快速仿真原型器RCP、实时仿真器HIL、I/O转接板以及显示器等构成。实验输电线路的关键参数详如表1所示。

实验中设定所应用的正态云神经网络模型的采样周期为15 ms,运行时长为39 s,所采集的二维控制信号数量为1 200组。在实验仿真平台中,分别检验本文方法控制下,不同场景设定下的实验输电线路运行频率。

对本文所用的神经网络系统进行训练,训练数据来源于某500 kV的高压直流输电线路实时监控系統,该线路从A市延伸至B市,全长1 048.6 km,是连接西部能源基地与东部负荷中心的关键电力通道,数据从SCADA系统、气象站和历史维护记录获取,训练次数为1 000次。表2为训练神经网络时使用的数据。

由表2可知,对神经网络进行训练后,频率差信号数值上升,频率变化率、发电机功角和直流输送

表 1 实验输电线路关键参数

参数类别	参数名称	典型值/描述
输电系统规格	额定电压	±500 kV
	额定电流	3 kA
	输电功率	3 000 MW
换流站配置	换流器类型	LCC为主流,部分采用VSC
	换流变压器容量	1 000 MVA
	换流阀数量	12脉波整流器
	无功补偿装置	整流侧和逆变侧各 200 Mvar
输电线路	线路长度	1 048.6 km
	导线类型	高强度、高导电性能的导线材料
控制策略	控制方式	定电压控制、定电流控制、定功率控制等

功率均下降。在不影响系统响应速度的前提下,有效降低了频率波动率。该神经网络的结构分为输入层、隐藏层和输出层。输入层对应于频率差信号和频率变化率,有 2 个神经元,隐藏层使用 ReLU 激活函数,有 3 个神经元,输出层用于输出稳态控制信号,有 1 个神经元。从输入层到隐藏层的权重为 0.3,系数为 0.45,从隐藏层到输出层的权重为 0.5,系数为 0.4。

选取直流系统送端频率稳定控制方法(文献

表 2 训练神经网络数据

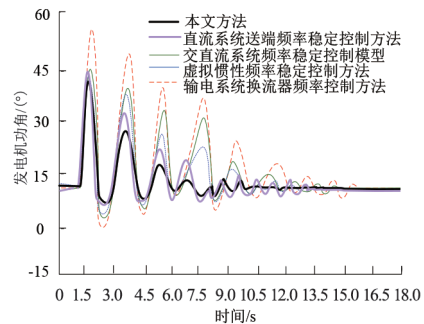
参数类别	训练状态	数值
频率差信号/Hz	正常运行	0.5
	训练后运行	1.0
频率变化率/(Hz·s ⁻¹)	正常运行	0.05
	训练后运行	0.01
发电机功角/(°)	正常运行	20
	训练后运行	10
直流输送功率/(×10 ³ MW)	正常运行	2
	训练后运行	1.5

[6]方法)、交直流系统频率稳定控制模型(文献[7]方法)、虚拟惯性频率稳定控制方法(文献[8]方法)、输电系统换流器频率控制方法(文献[9]方法)作为本文方法的对比方法。

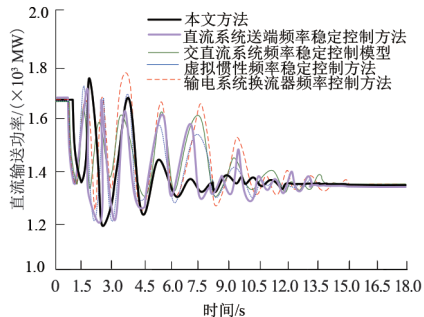
检验在正常运行场景下,实验输电线路的逆变

侧与整流侧双侧频率差及变化率信号均为正时,实验输电线路处于高频率运行状态,经各个方法控制后的实验输电线路的发电机功角及直流输送功率变化情况,如图 6 所示。

由图 6 可知,在正常运行场景下,实验输电线路处于高频率运行状态时,本文方法、直流系统送端



(a) 正常运行下实验输电线路的发电机功角



(b) 正常运行下实验输电线路的直流输送功率

图 6 正常运行下各方法控制后高频率实验输电线路运行情况

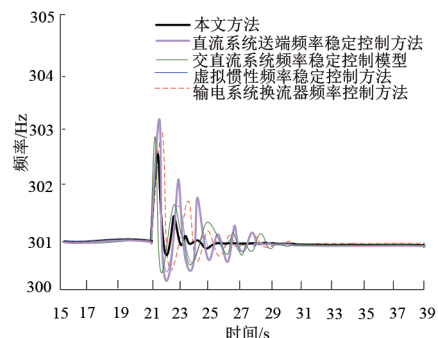
频率稳定控制方法、虚拟惯性频率稳定控制方法对实验输电线路的稳态控制效果均较好,均能够有效抑制实验输电线路的振荡情况,保证此状态下实验输电线路的平稳运行。但相比之下,在本文方法的控制下,实验输电线路的发电机功角与直流输送功率能够更快恢复稳定;交直流系统频率稳定控制模型、输电系统换流器频率控制方法 2 种方法的控制效果稍差,高频率下对输电线路振荡抑制的效果不够理想。

在实验输电线路高频率运行状态下,当运行时间为 21 s 时,切除实验输电线路的送端系统负荷,此时实验输电线路将产生盈余功率,即加入功率扰动。检验在此状况下,各方法控制后,实验输电线路的运行频率、频率变化率、发电机功角以及直流输送功率变化情况,如图 7 所示。

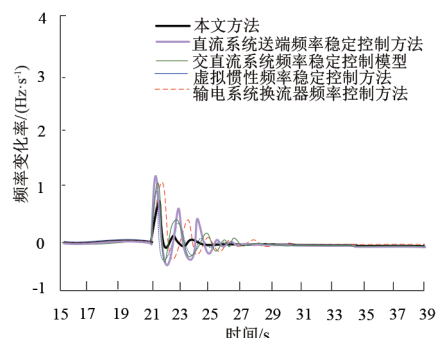
分析图 7 可得知,在运行时间为 21 s 时,加入功率扰动的情况下,各方法控制下的实验输电线路运行频率均到达最高值,且扰动加入时输电线路的频率变化率也最高,但与其他对比方法相比,本文方法控制下,输电线路在加入扰动时的频率升高趋势明显更低,可更有效地阻碍高频率运行下,扰动时刻频率的波动态势;直流输送功率在扰动加入时有所升高,但在本文方法与虚拟惯性频率稳定控制方法的控制下,可承担实验输电线路扰动时的大量盈余功率,且能够快速平稳实验输电线路的直流输送功率;发电机功角在扰动加入时同样出现升高趋势,但在本文方法的控制下,实验输电线路的发电机功角能够在扰动加入后 5 s 内恢复平稳,控制速度明显高于其他方法。本文方法在进行实时监测时,所得参数数据产生的噪声影响很小,对最终的控制效果影响很小,可以忽略不计。

3 结论

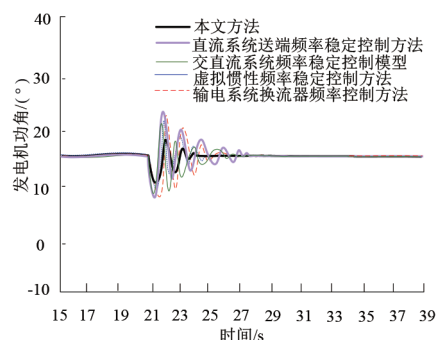
本文所应用的正态云神经网络结合了正态云模型和广义动态模糊神经网络模型,通过降低数据



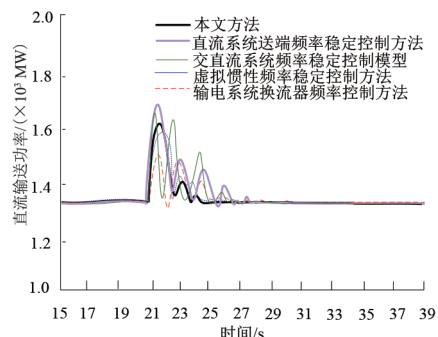
(a)加入扰动下实验输电线路的运行频率



(b)加入扰动下实验输电线路的频率变化率



(c)加入扰动下实验输电线路的发电机功角



(d)加入扰动下实验输电线路的直流输送功率

图 7 功率扰动下各方法控制后高频率实验输电线路运行情况

的噪点扰动,提升了精确度;训练神经网络系统,降低了频率波动率,通过实验验证控制高压直流输电线路可以在稳定的频率下运行,进行实时监测时所得数据产生的噪声影响很小,对最终的控制效果影响很小,证明了本文方法的有效性和稳定性。

参考文献:

- [1] 王杨,夏菲,田旭,等.基于谐波状态空间的高压直流输电系统SISO阻抗建模及稳定性分析[J].中国电机工程学报,2024,44(5):1985-1999.
- [2] 项雷军,陈昊,聂卓赞.计及温控负荷响应的二维云模型分布式频率控制[J].控制理论与应用,2022,39(10):1825-1835.
- [3] 刘泽洪,马为民,王绍武,等.混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J].电网技术,2021,45(3):1214-1222.
- [4] 王蕾,孙孝峰,王宝诚,等.LCC-MMC混合高压直流输电系统直流线路故障保护方案研究[J].中国电机工程学报,2021,41(21):7339-7352.
- [5] 赵莹萍,潘欢.一种基于模块化多电平换流器的多端高压直流输电系统协调控制方法[J].现代电力,2023,40(1):100-107.
- [6] 黄冠标,翟鹤峰,赵利刚,等.基于FPGA的高压直流输电系统建模与实时仿真[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(2):122-128.
- [7] 辛业春,张嘉新,江守其,等.提升特高压直流系统送端频率稳定性的协调控制策略[J].电网技术,2023,47(12):5089-5097.
- [8] 周雷,田蓓,卓谷颖,等.考虑多能互补的多区域交直流系统频率稳定联合控制模型[J].可再生能源,2021,39(5):681-686.
- [9] 徐海珍,余畅舟,毛福斌,等.基于频率稳定性提升的虚拟惯性优化控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):126-133.
- [10] SUH J, LEE J, JUNG S, et al. Imbalance-based primary frequency control for converter-fed microgrid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(2):247-256.
- [11] 张铸,饶盛华,张仕杰.基于自适应正态云模型的灰狼优化算法[J].控制与决策,2021,36(10):2562-2568.
- [12] 王凌云,李梦娇,杨雨琪,等.基于ISSO-PP组合赋权的双向区间约束正态云模型的换流站阀冷系统冷却能力研究[J].南方电网技术,2023,17(3):27-37.
- [13] 刘兆君.普通变量正态云系数线性回归的优化模型[J].统计与决策,2022,38(8):43-46.
- [14] 赵慧,赵洪峰,李梅,等.特高压直流输电系统换流阀故障谐波特性研究[J].计算机仿真,2021,38(12):79-84.
- [15] 李志平,洪潮,靳巩固,等.高压直流换流器解锁启动原理及工程验证[J].南方电网技术,2021,15(8):22-29.
- [16] 王彤彤,文俊,靳海强,等.LCC-MMC混合直流输电系统直流回路谐振特性研究[J].电网与清洁能源,2021,37(3):1-7+16.